Production d'électricité par petites centrales hydroélectriques

par **Pierre LAVY**
Ingénieur de l'École nationale supérieure d'ingénieurs électriciens de Grenoble (IEG)
Ancien directeur technique de l'hydraulique d'EDF

1. Terminologie ..... D 4 009 - 2

2. Études et définition de l'équipement ..... — 2
2.1 Études préliminaires ..... — 2
2.2 Études de faisabilité ..... — 3
2.3 Avant-projet détaillé ..... — 3

3. Déroulement du projet ..... — 4
3.1 Démarches administratives ..... — 4
3.2 Avancement du projet ..... — 4

4. Génie civil et infrastructures ..... — 4
4.1 Type d'aménagement ..... — 4
4.2 Ouvrages de retenue ..... — 5
4.3 Ouvrages annexes ..... — 5
4.4 Ouvrages de dérivation ..... — 6
4.5 Usine de production ..... — 7
4.6 Ligne de livraison d'énergie ..... — 8
4.7 Accès aux sites ..... — 9

5. Matériels hydrauliques ..... — 9
5.1 Turbines ..... — 9
5.2 Vannes ..... — 10
5.3 Grilles et évacuation des corps flottants ..... — 12

6. Matériels et services auxiliaires ..... — 13
6.1 Multiplicateurs ..... — 13
6.2 Paliers, butées et pivots ..... — 13

7. Matériels électriques ..... — 13
7.1 Générateurs ..... — 13
7.2 Transformateurs ..... — 14
7.3 Circuits électriques de puissance ..... — 14
7.4 Cellules de haute tension ..... — 15
7.5 Ligne de transport ..... — 15

8. Automatismes et conduite ..... — 15
8.1 Régulation de vitesse (RV) ..... — 15
8.2 Régulation de tension (RU) ..... — 15
8.3 Automatismes de conduite et protection ..... — 15

9. Exploitation ..... — 16

Pour en savoir plus ..... Doc. D 4 009

L'énergie hydroélectrique est une composante essentielle des énergies renouvelables et de la réduction de l'effet de serre.

En France comme en Europe, les aménagements importants ont été construits dans les décennies passées. Leur exigence de forte capitalisation et leur longue

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

durée de vie font que la « grande » hydraulique n'a plus de développement important en Europe. Cependant, elle demeure un élément fondamental pour la régulation et la stabilité des grands réseaux interconnectés, du fait de sa souplesse d'utilisation, de sa rapidité de réponse et de sa disponibilité.

Les réglementations nationales et européennes, favorisant le développement des énergies renouvelables, ont été mises en place pour diminuer les productions d'énergies polluantes ou accentuant l'effet de serre. Des objectifs ambitieux et des politiques de prix ont été proposés aux industriels pour développer les énergies renouvelables, et la petite hydraulique reste la meilleure réponse aux enjeux de production écologique.

Dans les pays en développement, le rôle des petites centrales hydrauliques est plus important, dans la mesure où les réseaux sont moins puissants et la diversité des solutions hydrauliques permet des solutions locales et décentralisées de production.

Le lecteur intéressé sur le sujet pourra trouver des informations complémentaires dans : [D 3 930] [D 4 008] [B 4 407]

1. Terminologie

Les instances européennes appellent « petits aménagements hydroélectriques » ceux dont la puissance n'excède pas 10 MW.

En France, ce parc représente plus de 1 800 centrales, totalisant une puissance de 2 000 MW et un productible de 8 500 GWh. Depuis la loi de février 2002, le seuil de classement de petit aménagement a été porté à 12 MW.

Ces petits aménagements hydroélectriques, dont la plupart sont au fil de l'eau, ne jouent aucun rôle dans la gestion d'un grand réseau et, de ce fait, peuvent admettre des simplifications, tant au niveau de la conception (standardisation, simplification des circuits) que de l'exploitation, tout en assurant une sécurité publique maximale par rapport aux personnes et aux biens.

La conception des ouvrages et des matériels ne doit pas se limiter à une simple réduction homothétique de ceux des grosses centrales, mais doit répondre à des objectifs de :

— simplicité ;
— grande fiabilité ;
— durée de vie égale à celle du titre administratif, en général voisin de 30 ans.

La conception doit intégrer la nécessité d'une maintenance minimale et d'une périodicité rare. L'exploitation doit être simple et pouvoir être assurée par du personnel non-spécialisé. Pour cela, la conduite et le fonctionnement sont entièrement automatiques avec des équipements fiables et sûrs, et des réglages optimisant la production.

2. Études et définition de l'équipement

Un aménagement hydroélectrique comprend :

— une prise d'eau en rivière ou dans une retenue ;
— des ouvrages d'amenée ;
— une usine de production ;
— une restitution au cours d'eau ;
— une ligne d'évacuation d'énergie ;
— des accès aux sites.

La définition d'un équipement hydraulique se fait après une succession d'études visant à déterminer le meilleur investissement pour utiliser le gisement hydraulique. Le coût des études, s'il doit rester modeste (10 à 15 % du projet), doit conduire à minimiser les risques économiques.

2.1 Études préliminaires

Les études doivent prendre en compte l'ensemble des paramètres physiques et administratifs de l'environnement du projet. Trop de projets, dans le passé, ont manqué d'études approfondies et ont conduit à des résultats économiques décevants.

Ces études ciblent deux objectifs :

— la **sûreté** pour être irréprochable dans l'environnement et exemplaire pour le public ;
— la **rentabilité** pour assurer l'économie du projet et le développement de l'hydraulique.

Elles doivent débuter par la recherche de la meilleure utilisation du gisement de la rivière, pour préserver l'avenir d'autres projets. Pour cela, il faut rassembler les renseignements géographiques, géologiques, climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques, et rechercher les divers documents sur la région. Les situations les plus propices seront recherchées pour la prise d'eau et la restitution.

Les études hydrologiques doivent être poussées pour optimiser le débit d'équipement et assurer la meilleure rentabilité du projet. Le module (la moyenne interannuelle calculée sur le plus grand nombre d'années possible), les valeurs moyennes mensuelles et les valeurs extrêmes, en crue et en étiage, doivent être recherchés pour estimer les recettes en année normale, en année extrêmement sèche et aussi pour prévoir les équipements en rivière qui permettront de passer les crues extrêmes, sans dommage pour l'installation et l'environnement.

Beaucoup de données sur des chutes et débits des rivières françaises sont recensées dans les annuaires hydrologiques des services hydrologiques de l'administration, des agences de bassins ou autres utilisateurs des rivières. Les renseignements oraux sur les phénomènes extrêmes sont à rechercher auprès des riverains et des responsables locaux pour compléter la connaissance de la rivière. Les laisses de crues seront repérées pour corroborer les dires.

Sur certains cours d'eau, et en cas d'incertitude, il peut s'avérer nécessaire d'installer un limnigraphe près du site prévu de la prise

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
© Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

d'eau. Ces appareils s'installent au plus tôt, dans un endroit calme, pour avoir le plus possible des mesures significatives. Il est conseillé de faire installer et suivre les mesures par le cabinet qui fera l'étude d'impact du projet. Ses hydrologues doivent être à même d'étalonner et d'assurer des données de qualité.

La qualité de l'eau (pH, dureté, pureté) est à mesurer à divers moments de l'année et sera à fournir pour les consultations des entreprises. Les transports solides et les corps flottants seront suivis dans les situations de crues et d'étiages pour estimer les risques de sédimentation et d'abrasion.

2.2 Études de faisabilité

2.2.1 Définition du schéma d'aménagement

À partir des éléments permettant de situer les ouvrages du projet, il est nécessaire de préciser les éléments du projet. Une cartographie des lieux, au 1/50 000 ou 1/25 000, est utilisée pour déterminer les accès et le passage de ligne, et les relevés cadastraux pour connaître les propriétaires des terrains concernés. Les levés de terrain sont indispensables pour préciser la dénivellation et, pour les centrales qui ne sont pas au fil de l'eau, le passage possible des ouvrages de dérivation.

Si une retenue est projetée, le calcul de sa capacité nécessite un relevé topographique (1/1 000) au sol pour être précis. Pour les retenues importantes (ce qui est rare pour de petites centrales), des relevés très précis des lignes d'eau seraient nécessaires pour vérifier les points singuliers (affluents, col...).

Une première esquisse : des ouvrages de prise, de dérivation (canal, conduite...), de l'usine et de la restitution est tracée.

Si la géologie locale est incertaine ou variée, il sera utile de demander l'avis d'un géologue sur le tracé des ouvrages. Des sondages doivent être faits, de toute façon, au niveau des ouvrages importants pour en préciser l'importance ou, au moins, faire des tranchées de reconnaissance. La situation des nappes phréatiques et des sources environnantes devra être connue.

2.2.2 Définition de l'équipement

Le débit d'équipement est le paramètre principal définissant le projet. Plusieurs variantes sont étudiées pour comparer leurs coûts et les recettes correspondantes.

Il s'agit d'abord d'établir le productible. Le productible moyen (W_{pm}) correspond à la production d'une année calculée avec des débits journaliers, qui sont la moyenne des débits de ce jour, observés sur la plus grande période possible et en utilisant tous les débits.

L'énergie produite dépendra du débit d'équipement. La puissance installée P (kW) se calcule par la formule :

$$P = k \cdot Q_e \cdot h$$

avec k coefficient dépendant du rendement global de l'installation, tenant compte des pertes de charge le long du circuit hydraulique et des rendements de chaque machine, turbine, multiplicateur, alternateur, transformateur, auxiliaire. Pour les machines importantes et en première approximation, on peut prendre $k = 8$, entre 6 et 8 pour les machines plus faibles,

Q_e débit d'équipement (m^3/s),

h hauteur brute (m).

Le productible théorique W_t, se calcule à partir de cette puissance et des données hydrologiques limitées au débit Q_e d'équipement. Pour cela on utilise la courbe des débits classés qui trace le nombre de jours où le débit est supérieur à un débit donné (cf. § 1.3 [D 4 008]).

La puissance des micro-ordinateurs actuels permet de calculer la production sur la durée des chroniques de débit et de préciser la production moyenne possible. Pour les installations avec réservoir, ces simulations de fonctionnement sont impératives.

La recette annuelle théorique découlera des négociations sur les tarifs avec l'acheteur sur les bases des productibles théoriques sur les différentes périodes tarifaires.

2.2.3 Dimensionnement des ouvrages et des matériels

Les ouvrages du circuit d'eau sont dimensionnés pour le débit d'équipement retenu. Si l'équipement comporte un réservoir, les dimensions du barrage sont déterminées par le volume à stocker et les courbes de capacité déduites des levés topographiques. Il faut aussi prévoir la gestion des transports solides et les équipements nécessaires aux chasses, dégravages ou curages.

Les ouvrages de prise et d'amenée sont dimensionnés pour obtenir un compromis économique entre pertes de charges et coût. En effet, les pertes de charge aux grilles de prise, dans le canal ou la conduite d'amenée, diminuent quand leur section augmente. Leur coût, calculé sur les bases du contrat espéré de vente de l'énergie, est à comparer au surcoût de l'augmentation de section de passage (cf. § 4.3.2 [D 4 008]).

Dans le cas de production en réseau séparé (village isolé), le calcul se fait sur le coût comparé d'une production par d'autres moyens (thermique, éolien, solaire...).

Le nombre de groupes de production dépend de l'amplitude des variations de débit et des possibilités de fonctionnement à différentes charges du type de groupe, si l'intérêt économique le justifie. Le type de turbine dépendant du débit turbiné et de la hauteur de chute, le choix se fait à partir d'abaques qu'utilisent les constructeurs.

Le choix de la solution retenue correspondra à l'optimum entre le coût de la construction et la valorisation de la quantité d'énergie produite.

Le coût du génie civil se fait à partir des « prix d'ordre » des travaux majorés pour tenir compte des aléas techniques. Cette majoration peut varier de 10 à 50 % par poste, en fonction des incertitudes laissées par les études préliminaires. Le coût des matériels se fait à partir des propositions estimatives faites par les constructeurs.

Les devis doivent tenir compte de tous les postes :

— dossier d'impact et mesures compensatoires ;
— accès ;
— ouvrages de génie civil ;
— matériels et équipements hydrauliques et électriques ;
— évacuation de l'énergie ;
— ingénierie et intérêts intercalaires éventuels.

Le choix entre plusieurs variantes se fera par une étude économique et financière pour déterminer la plus rentable.

2.3 Avant-projet détaillé

Il envisage une mise au point définitive du projet pour rédiger les pièces définitives des appels d'offres aux différents corps de métiers. Pour confirmer les données des études précédentes et pour éviter les contestations éventuelles des entreprises et fournisseurs, les plans et les exigences techniques doivent être précisés :

• Dimensionnement des ouvrages de prise, canaux, galerie, cheminée d'équilibre, conduite forcée, canal de fuite.

• Définition de l'agencement de la centrale avec le circuit d'eau, l'emplacement des groupes et des matériels auxiliaires, les facilités de maintenance, les circuits de ventilation, les dispositions d'hygiène et de sécurité du personnel. Le plan de masse précisera

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

les charges statiques et dynamiques des machines et permettra à l'architecte de proposer un projet de permis de construire.

• Définition des groupes : type et puissance de la turbine, vitesse nominale, type et puissance du générateur.

• Implantation des groupes : axe (vertical, horizontal, oblique), calage par rapport aux niveaux amont et aval, niveaux des planchers.

• Caractéristiques des machines en marche normale et transitoire, inertie des parties tournantes et tenue à l'emballement, conditions de survitesse et surpression, intensité de court-circuit et conditions de surtension.

• Définition des procédés de montage et d'entretien définissant les dispositifs de manutention, les charges à supporter, les plages de montage et stockage.

• Définition des services et appareils auxiliaires et de leur emplacement, des transformateurs du poste électrique et des automates.

• Définition des conditions de raccordement au réseau d'électricité et conditions du contrat de vente.

• Définition des asservissements et régulations de vitesse et tension, des principes de conduite, des automatismes de protection et des télécommunications.

• Établissement du programme des travaux et des échéances administratives et financières.

3. Déroulement du projet

3.1 Démarches administratives

Elles sont liées à la réglementation du pays pour obtenir :

— le titre administratif (autorisation préfectorale si la puissance est inférieure à 4 500 kW, ou concession au-delà) ;
— le cahier des charges ou règlement d'eau ;
— les autorisations locales (permis de construire, de passage, contrat de vente...).

Un dossier d'impact est nécessaire pour déposer la demande de titre. L'étude pour établir ce dossier pouvant demander une année d'observations, il faut la lancer auprès d'une société spécialisée dès que la décision de réaliser est prise.

La réalisation du projet peut s'effectuer selon les capacités du maître d'ouvrage, selon les modalités suivantes ou toute solution intermédiaire :

— un contrat unique est passé à un entrepreneur général, qui prend la responsabilité de la coordination du chantier, entre sa propre intervention et ses sous-traitants fournisseurs de travaux ou matériels, qui ne sont pas de sa compétence ;
— des contrats distincts sont confiés à des entreprises et fournisseurs spécialisés.

Dans tous les cas, les règles d'appel d'offres en vigueur sont à respecter, et les responsabilités du maître d'ouvrage à bien cerner. En général, pour les petites centrales, trois lots principaux sont envisageables.

1. Le génie civil et les études d'exécution (par un bureau spécialisé ou par l'entrepreneur).

2. L'électromécanique pour les groupes et les matériels du circuit hydraulique : grilles de prise, dégrilleur, vannes et accessoires...

3. Équipements électriques : circuits de haute et basse tension, transformateurs, armoires de poste, automatismes, télésurveillance, services généraux.

Les spécifications des ouvrages ou matériels doivent porter sur les fonctions principales attendues du projet et laisser le prestataire libre de rechercher les solutions économiques et fiables qui respectent les fonctions et garanties à attendre du projet.

Les garanties demandées doivent assurer l'économie du projet dans la durée du titre et la sûreté des ouvrages et de l'exploitation. Outre les contrôles réglementaires ou normalisés, les garanties exigées doivent pouvoir être contrôlées.

3.2 Avancement du projet

L'analyse des offres peut amener à des négociations sur des précisions de réalisation ou réserve du soumissionnaire, à l'examen de variantes ou programme des travaux, aux conditions de paiements. Après accord, les contrats peuvent être signés et les travaux peuvent démarrer.

Durant les travaux, sur le site comme dans l'usine, les contrôles prévus sont exécutés et, à la fin de chaque lot, leur réception sera faite conformément aux règles commerciales en vigueur.

La mise en service se fait sous la responsabilité des prestataires, après vérification de fonctionnement des sous-ensembles :

— mise sous tension des auxiliaires ;
— mise en eau des circuits hydrauliques ;
— rotation du groupe à vide puis couplage ;
— essais électriques ;
— essais en phases transitoires (déclenchements en charge, survitesse...).

Le transfert de propriété des fournitures se fait selon les conditions des contrats et doit être associé à la fourniture des dossiers de maintenance avec les comptes rendus de mise en service.

4. Génie civil et infrastructures

4.1 Type d'aménagement

Un aménagement hydroélectrique est adapté au site et toutes les fonctions hydrauliques citées au paragraphe 2 ne sont pas toujours nécessaires. Le classement habituel se fait d'après la hauteur de chute utilisée.

• Les basses chutes sont des chutes sur les seuils et barrages des cours d'eau ou canaux, généralement sans longue dérivation (figure **1**).

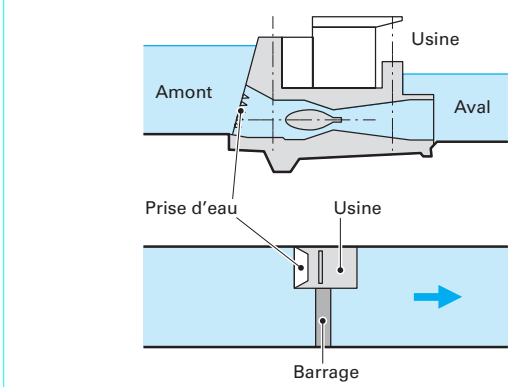

Figure 1 – Basse chute au fil de l'eau avec groupe bulbe

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

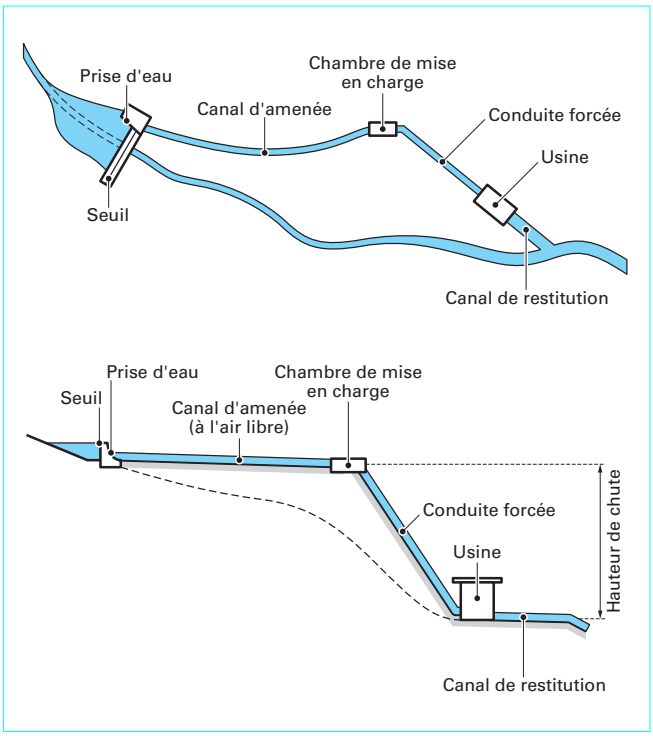

Figure 2 – Chute avec dérivation

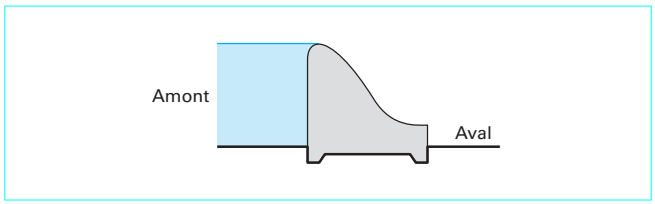

Figure 3 – Seuil en rivière

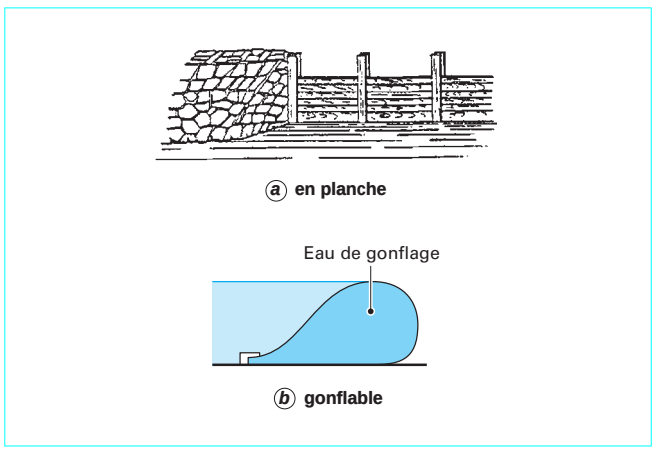

Figure 4 – Barrage

• Les chutes moyennes et hautes chutes peuvent être sans dérivation si elles sont incluses dans un barrage, avec un ouvrage d'amenée (galerie, canal ou conduite) et un ouvrage en charge (conduite forcée), une cheminée d'équilibre peut alors s'avérer nécessaire entre ces deux derniers ouvrages (figure **2**).

4.2 Ouvrages de retenue

Un seuil est un barrage de faible hauteur dont la fonction est de maintenir un plan d'eau pour dériver une partie du débit dans un canal ou dans l'admission d'une turbine.

Un barrage est un ouvrage créant une surélévation significative du plan d'eau et permettant un stockage plus ou moins important des débits.

Les technologies utilisées dépendent beaucoup de la géologie locale pour définir l'étanchéité et fournir les matériaux de construction.

4.2.1 Seuils et petits barrages

Les techniques anciennes rencontrées sont, selon le terrain, en maçonnerie, en bois associé à des enrochements, à aiguilles de bois sur des radiers en maçonnerie. Actuellement, on utilise les gabions, les palplanches, les structures gonflables sur seuil en béton (figure **3**), plusieurs techniques pouvant être utilisées sur le même site (figure **4*a***).

Les barrages gonflables sont constitués d'un boudin en caoutchouc gonflé à l'eau. Ils permettent de modifier la cote de retenue et peuvent ainsi réaliser aussi un évacuateur de crue (figure **4*b***).

4.2.2 Grands barrages

Les différentes technologies utilisées sont explicitées dans [D 4 008]. Elles dépendent des matériaux utilisables proches du site. Il s'agit principalement des barrages en terre, en enrochements, en béton poids ou voûte et des barrages mobiles.

4.3 Ouvrages annexes

Ils complètent le barrage pour assurer toutes les fonctions de sécurité de l'ouvrage et les exigences administratives.

4.3.1 Évacuateurs de crue

Ils sont nécessaires pour les barrages qui ne sont pas construits pour être submergés en cas de crue ou de non-utilisation de l'eau dérivée, c'est-à-dire ceux qui sont équipés de crête déversente. Les écoulements doivent alors passer par un dispositif adapté prévu pour admettre la crue maximale, dite crue de projet, qui correspondrait au maximum possible d'après les études hydrologiques. On admet des débits dont la probabilité d'occurrence est de 1/1 000 pour les barrages robustes en béton, à 1/10 000 pour les barrages en enrochement ou terre.

Les évacuateurs doivent être sûrs et aussi autonomes que possible. Ils peuvent être à écoulement libre dans un déversoir, ou à écoulement contrôlé par des vannes. D'autres systèmes tels que les puits ou les siphons font écouler l'eau par un conduit à l'aval (cf. § 4.2.1 [D 4 008]).

Dans tous les cas, l'énergie de l'eau doit être dissipée dans un bassin de façon à ne pas agir sur les structures et fondations du barrage. L'ensemble des ouvrages doit être approuvé par les autorités administratives chargées de la sûreté des barrages.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

4.3.2 Organes de vidange, de dévasement

Ils sont indispensables pour maîtriser en toute circonstance la cote de remplissage ou pour vider complètement la retenue. Ils sont constitués :

— par une prise de vidange fermée par une « vanne de fond » ;
— une conduite en acier ou béton ;
— une vanne de réglage du débit à l'aval. Son dimensionnement dépend de la rapidité de vidange admissible par l'aval selon les cotes du barrage.

4.3.3 Organes de débits réservés

En cas de dérivation, les réglementations ou titres administratifs imposent de laisser un débit réservé dans le lit court-circuité. Des dispositifs devront être prévus pour pouvoir répondre à ces exigences de permanence du débit et de contrôle de sa valeur, quels que soient les apports ou la quantité dérivée. Ils sont constitués de diaphragmes ou de vannes fiables et capables de briser l'énergie du débit de l'eau, comme les vannes à jet creux. Ils doivent être situés de telle façon qu'ils ne risquent pas l'envasement ou l'obstruction.

4.3.4 Passes à poissons

Sur beaucoup de rivières, il est imposé de permettre la remontée et la descente des poissons migrateurs. L'étude de ces dispositifs doit être confiée à des sociétés spécialisées. Selon la dénivellation à franchir et les races de migrateurs, la conception est différente. Les différentes conceptions sont explicitées dans [D 4 008].

Sur les retenues de faible hauteur, pour les anguilles, un système de plan incliné humide peut s'avérer suffisant ; par contre, pour les salmonidés, une échelle à poissons est nécessaire (cf. § 4.2.4 [D 4 008]).

4.4 Ouvrages de dérivation

4.4.1 Prises d'eau

Elles sont situées dans la retenue et sont équipées de grilles limitant l'entrée des corps flottants ou des matériaux (cf. § 4.3.1 [D 4 008]).

Dans une retenue de barrage important, la prise d'eau est située en dessous de la cote minimale d'exploitation de façon à être toujours noyée, mais au-dessus des dépôts d'alluvions prévisibles pour ne pas les entonner.

Sur les cours d'eau à forts débits (basse chute), un dégrilleur est à prévoir pour éviter le colmatage des grilles. La prise nécessite une assise pour installer un dégrilleur fixe (pour une largeur de grille réduite à quelques mètres), ou des voies de roulement s'il est mobile. Un canal d'évacuation et un bac de réception des déchets doivent être prévus.

Sur les torrents de montagne à forts transports solides, la prise sera « par en dessous ». Elles dérivent en général de débits assez faibles (< 10 m^3/s), mais sous des chutes importantes. Souvent difficiles d'accès, elles doivent être autonomes. Les grilles à gros barreaux sont inclinées de 20 à 30 % vers l'aval. Cette disposition permet l'auto-nettoyage par la poussée du courant sur les dépôts encombrant les grilles.

Leur longueur doit permettre d'entonner sans perte l'eau qui tombe dans un bassin assez grand pour que sa vitesse soit suffisamment basse (< 0,5 m/s) pour faire décanter les apports solides (> 0,1 mm) avant de s'engager dans l'ouvrage d'adduction.

Le bassin de décantation est fermé par une vanne de grosse section qui, en position ouverte, sert à chasser les dépôts par un gros débit d'eau. La commande de cette vanne est automatique, son action est déclenchée par la quantité de dépôts, et sa manœuvre assurée par un couple-moteur à partir de l'eau du torrent, ce qui permet de se passer d'énergie externe.

4.4.2 Ouvrages d'amenée

Ils peuvent être :

— à écoulement libre (canal à ciel ouvert ou galerie) ;
— ou en charge (galerie ou conduite).

Le percement d'une galerie nécessite la mise en place de moyens importants, et il est soumis à des risques d'aléas géologiques importants. Il est donc rarement rentable pour les petits aménagements.

Le tracé d'un canal ou d'une conduite en charge suit les lignes de niveau avec une pente compensant les pertes de charges ; il évite les discontinuités et changements brusques de direction. Les revêtements doivent être lisses pour diminuer les pertes de charge. La section de l'ouvrage peut être trapézoïdale ou rectangulaire. Elle doit conduire à des vitesses maximales de l'ordre de 1 m/s si les revêtements sont peu lisses, à 3 m/s pour le béton lissé ou les peintures.

Pour les conduits en charge, un reniflard est nécessaire derrière la vanne de prise.

Un ouvrage d'amenée se termine par une chambre de mise en charge, d'où part la conduite forcée. Ses dimensions permettent des variations rapides de débit appelé par les machines, sans dénoyer la conduite forcée, une entrée d'air en conduite pouvant être catastrophique. Des grilles fines sont nécessaires à l'entrée des conduites. Un déversoir est prévu pour éviter les débordements en cas de fermeture rapide du débit ; le déversement sera évacué dans un canal, ou conduit d'évacuation.

Une cheminée d'équilibre s'avère souvent nécessaire sur les conduits en charge pour amortir les surpressions des coups de bélier en cas de fermeture rapide du débit, et éviter les dépressions en cas d'augmentation rapide de débit appelé. Elle permet des variations rapides de charge. Le calcul d'une cheminée d'équilibre doit être confié à des spécialistes.

4.4.3 Conduites forcées

Elles relient l'ouvrage d'amenée aux turbines et sont dimensionnées pour tenir la surpression et la dépression d'un coup de bélier sur une fermeture rapide de la turbine. Les valeurs extrêmes de ces pressions sont limitées par la cheminée d'équilibre et une ventouse placée en tête de conduite.

Elles peuvent être réalisées en acier, béton armé, plastique, fonte, selon les valeurs des charges. Les traitements de surfaces intérieures doivent être particulièrement lisses afin de diminuer les pertes de charge, et les revêtements extérieurs doivent résister à la corrosion. Ce sont les pertes de charge qui conditionnent le diamètre de conduite. On recherchera un optimum économique entre pertes capitalisées et surcoût d'augmentation de diamètre, en pratique la vitesse d'eau est de 3 à 7 m/s.

Le tracé de la conduite sera le plus court possible et suivra donc la ligne de la plus grande pente.

Elles sont, en général, posées à l'air libre et ancrées dans des massifs capables de tenir les poussées hydrauliques et les efforts thermiques en cas de vidange. Les efforts thermiques peuvent être réduits par des joints de dilatation glissants ou à ondes. Si le terrain le permet, elles peuvent être enterrées, ce qui réduit les efforts thermiques mais nécessite une protection contre la corrosion particulièrement soignée, et même, selon les terrains, une protection cathodique.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

4.4.4 Ouvrages de restitution

Ils relient l'échappement des turbines au lit de la rivière. C'est en général un canal à ciel ouvert, très court, mais peut être plus long sur les basses chutes.

Sur les très basses chutes, les écoulements doivent être soignés pour éviter les remontées de plan d'eau en aval et les pertes de hauteur de chute. La sortie des turbines doit être protégée contre l'érosion due à l'énergie résiduelle de l'eau.

4.5 Usine de production

4.5.1 Principes généraux

L'emplacement et l'architecture de l'usine sont fixés par :

— la topographie ;

— la géologie des lieux et les hauteurs d'eau en aval en cas de crue ;

— et le type de groupe utilisé.

Le bâtiment abrite et protège des plus hautes eaux les turbines, les générateurs, leurs auxiliaires et les dispositifs d'automatismes de protection et de comptage. Les transformateurs peuvent être à l'intérieur ou à l'extérieur auprès du bâtiment. Des dispositions doivent être prises pour éviter tout rejet de pollution à l'aval (huiles, produits de nettoyage...).

Le bâtiment peut être très simple, avec uniquement les moyens de maintenance courante, la maintenance lourde étant assurée par des moyens de manutention mobiles.

4.5.2 Groupes à chambre d'eau

Pour les petites turbines à réaction des basses chutes de faible puissance (< 300 kW), l'alimentation de la roue de turbine est faite dans une chambre sans pré-orientation des filets d'eau avant le distributeur. À puissance égale, le rendement est plus faible que sur des turbines à bâche, mais le génie civil est plus simple (figure **5**).

4.5.3 Groupes à bâche ou à injecteurs

La bâche spirale est le conduit qui répartit l'eau dans le distributeur des turbines à réaction. Pour les turbines à action, le ou les injecteurs alimentés par la conduite dirigent les jets tangentiellement.

Les axes des groupes Francis et Pelton, à un ou deux jets, peuvent être horizontaux ou verticaux. Ceux des groupes Pelton à plusieurs jets, Kaplan ou Hélice, sont verticaux, et leur bâche plus volumineuse est souvent plus économique en béton. Ces dispositions permettent les meilleurs rendements (figures **6** à **9**).

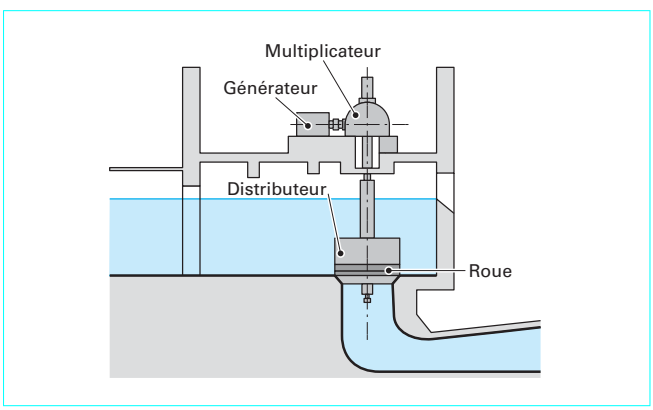

Figure 5 – Groupe à chambre d'eau

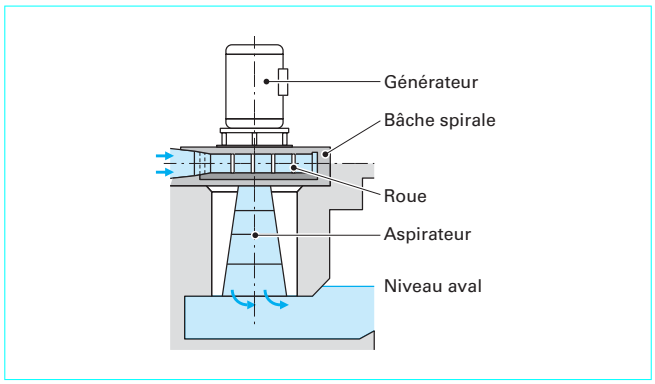

Figure 6 – Groupe Francis vertical

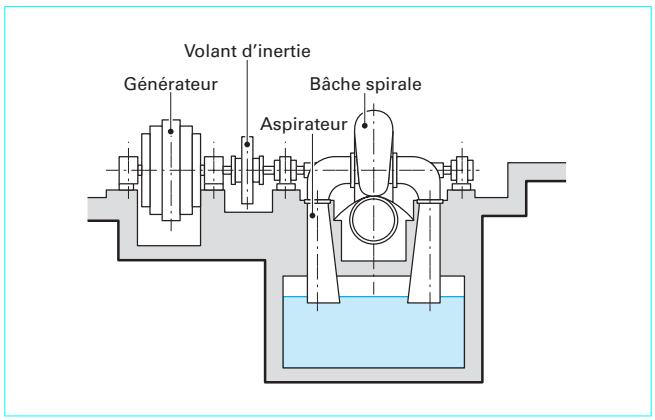

Figure 7 – Groupe Francis double horizontal

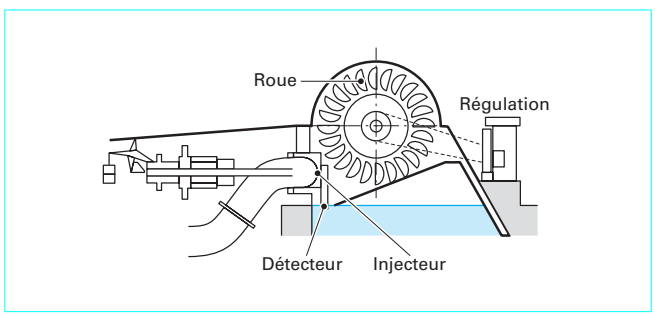

Figure 8 – Groupe Pelton horizontal

4.5.4 Groupes axiaux

Dans ces groupes, les turbines (Kaplan ou Hélice) et leurs distributeurs sont dans l'axe du conduit d'alimentation. Les conduits peuvent être métalliques ou en béton.

Dans les **groupes bulbes**, l'ensemble du groupe est à l'intérieur et dans l'alignement du conduit.

Le multiplicateur coaxial et le générateur sont à l'amont de la turbine (à l'aval, l'aspiration serait perturbée). Ce type de technique permet des gains importants de génie civil mais l'accès aux matériels complique la maintenance, et les étanchéités tournantes sont difficiles et fragiles (figure **10**).

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

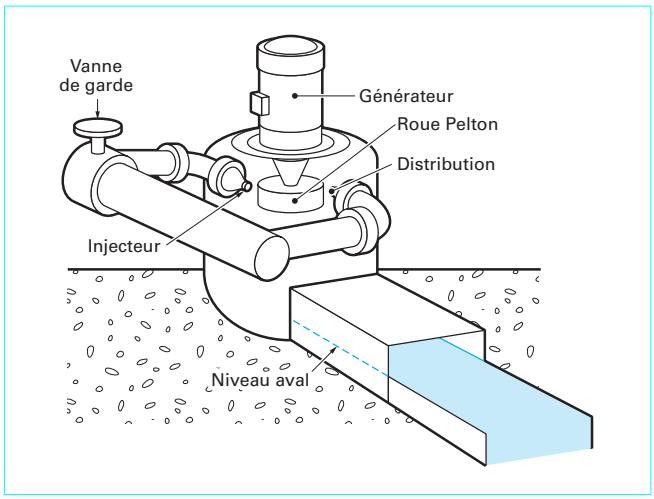

Figure 9 – Groupe Pelton vertical

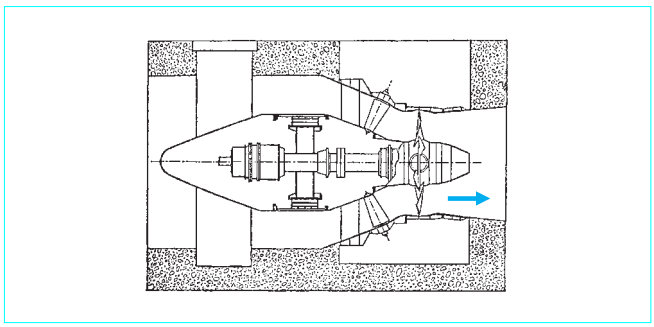

Figure 10 – Groupe bulbe

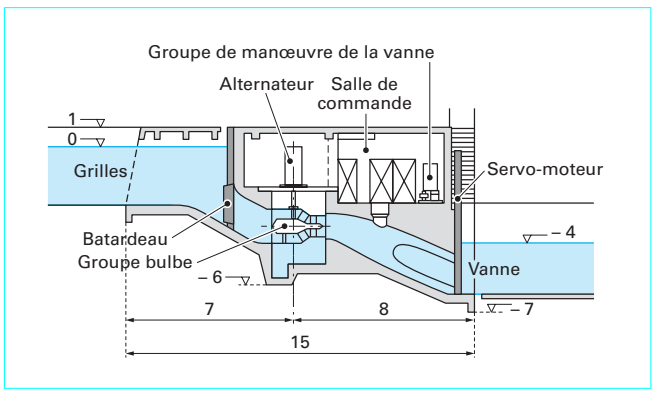

Figure 11 – Groupe puits à renvoi d'angle

Les **groupes puits** sont des groupes bulbes dans lesquels le générateur et le multiplicateur sont sortis dans un puits à l'amont de la turbine, ce qui rend accessible ces organes ; par contre le génie civil est plus cher que dans la solution bulbes.

Dans les **groupes puits à renvoi d'angle**, le multiplicateur conique permet de renvoyer l'alternateur à l'extérieur en gardant un conduit rectiligne et donc un génie civil simple. Cette solution ne permet pas de dépasser des puissances supérieures à 1 MW (figure **11**).

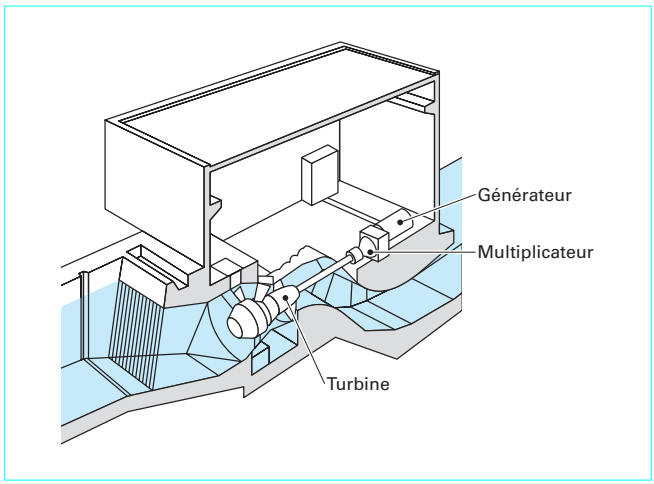

Figure 12 – Groupe en S

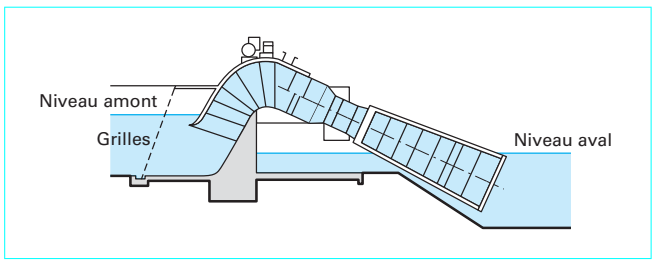

Figure 13 – Groupe siphon

Dans les **groupes en S**, le générateur est hors du conduit, l'axe de la turbine sortant dans un coude. Les groupes en S horizontaux ou légèrement inclinés permettent un génie civil simple avec générateur à l'amont sous la conduite d'amenée ou à l'aval sur le diffuseur. Une disposition verticale est économe en génie civil, mais fait perdre des points de rendement (figure **12**).

Il en est de même dans les **groupes siphons**, où le point haut est au-dessus du niveau haut de la retenue, ce qui permet de se passer de vanne de garde (figure **13**).

Les **groupes à manteau de roue mobile** sont des groupes axiaux dont le manteau de roue supporte le rotor de l'alternateur, le stator est donc concentrique de la turbine. Cette technique (dite Straflo®) a été appliquée pour des groupes de 1 000 à 10 000 MW, en dessous de ces valeurs le manteau de roue sert de poulie pour entraîner le générateur par une courroie.

Les inconvénients de ces groupes résident dans la difficulté de maintenir l'étanchéité des joints de grand diamètre ; le réglage des pales de roue est aussi délicat à réaliser et la présence d'un palier aval nécessite un croisillon de support qui perturbe l'écoulement aval.

4.6 Ligne de livraison d'énergie

Qu'elle soit aérienne ou enterrée, la ligne d'évacuation fait appel à des normes bien connues des prestataires. Son coût n'est pas négligeable, ses caractéristiques et son tracé doivent être étudiés avec le gestionnaire du réseau, dans le cadre du contrat de raccordement.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
© Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

4.7 Accès aux sites

Les accès aux différents ouvrages sont étudiés pour la construction et pour la maintenance, et leurs calibres adaptés aux charges des matériels à transporter.

Les ouvrages, étant dans la nature, sont à protéger contre les risques que pourrait encourir le public (pêcheurs, randonneurs...) et contre le vandalisme.

5. Matériels hydrauliques

5.1 Turbines

Leur technologie est décrite dans [B 4 407]. Ne sont décrites ici que les spécificités des turbines de petite hydraulique.

La turbine est l'organe qui transforme l'énergie potentielle et cinétique de l'eau en énergie mécanique. La roue en est la partie mobile entraînant l'arbre de rotation qui transmettra l'énergie mécanique au générateur. Cette énergie est égale à :

$$W_t = 9{,}81 \cdot v_t \cdot Q \cdot h_n$$

avec W_t puissance (kW),

v_t rendement de la turbine,

Q débit (m^3/s),

h_n hauteur de la chute nette à l'entrée de la turbine (m).

Le choix du type des turbines dépend de ces deux variables : la hauteur nette h_n et le débit Q. Les turbiniers proposent des abaques pour le choix de leur fabrication (figure **14**).

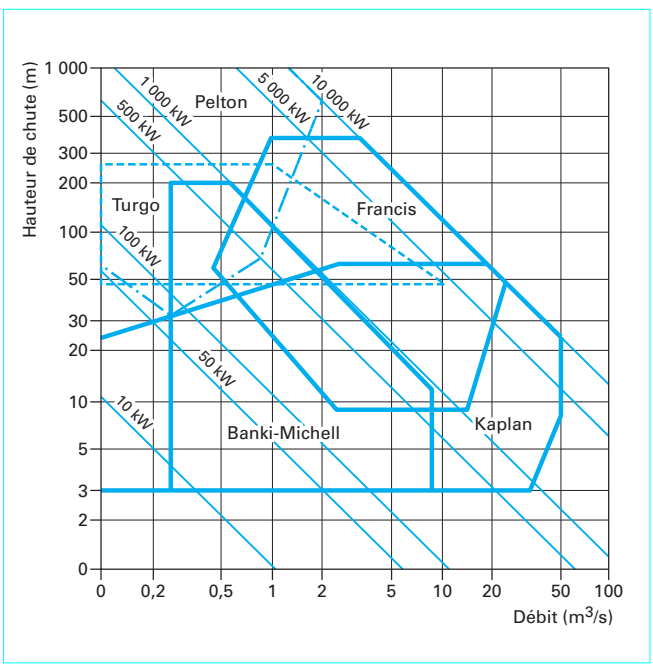

Figure 14 – Choix des turbines selon hauteur de chute (m) et débit (m^3/s)

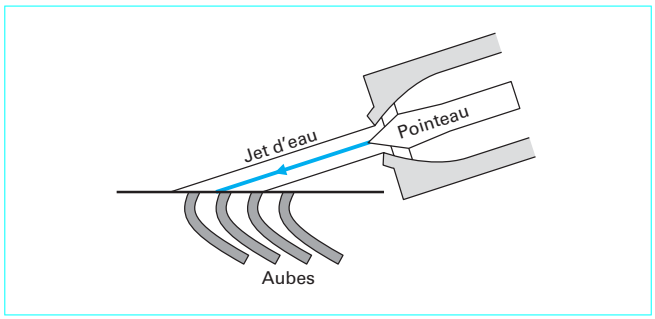

Figure 15 – Turbine Turgo (principe)

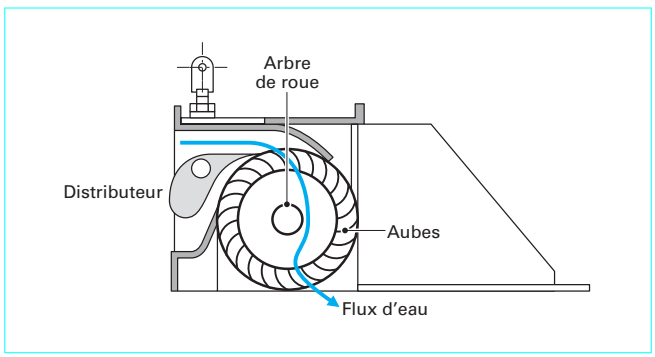

Figure 16 – Turbine Banki-Michell (principe)

On classe les turbines en deux grandes familles :
— les turbines à action (Pelton, Turgo, Banki) ;
— les turbines à réaction (Francis, Hélice, Kaplan).

5.1.1 Turbines à action

Les turbines **Pelton** sont utilisées sur des chutes élevées avec des rendements satisfaisants (85 %) qui dépendent de la parfaite géométrie des organes et de la capote environnant la turbine, et qui restent satisfaisants à charge réduite.

Les vitesses de rotation sont élevées (300 à 1 500 t/min) et leur inertie faible, qui peut obliger à augmenter cette dernière par un volant. La vitesse d'emballement (180 à 200 % de la vitesse nominale) est réduite par des déflecteurs, soigneusement dimensionnés, qui rentrent dans les jets sur déclenchement en charge.

La turbine **Turgo** est une turbine dont les injecteurs envoient leur jet tangentiellement sur une couronne d'augets à simple cuillère. Le couple moteur a donc une composante axiale, qu'il faudra prendre en compte sur la butée ou pivot de l'arbre (figure **15**).

La turbine **Banki** (figure **16**) est une turbine dans laquelle les aubes sont disposées de façon cylindrique ; l'écoulement traverse les aubes depuis le distributeur, se retrouve à l'intérieur de la roue et en ressort par les aubes opposées au distributeur. Ces turbines sont rustiques, volumineuses pour des puissances faibles et leurs rendements limités (75 %) mais évoluent peu avec la charge (figure **17**). Elles sont peu sensibles au colmatage par les feuilles et très faciles d'entretien.

5.1.2 Turbines à réaction hélico-centripètes

Les turbines **Francis** sont utilisées pour des chutes moyennes mais peu variables en hauteur et en débit. Il existe aussi des turbines Francis doubles pour certaines zones de débit et hauteur

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

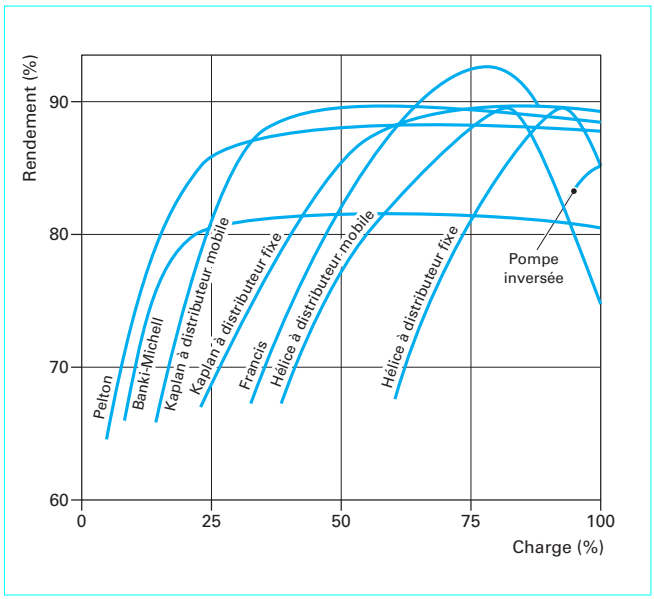

Figure 17 – Rendements des divers types de turbines

(figure **7**). Leur vitesse de rotation va de 100 à 1 000 t/min, et l'emballement de 180 à 230 % de la vitesse nominale, valeur dépassée en régime transitoire.

Dans les turbines actuelles, l'eau passe de la conduite dans une bâche d'alimentation en colimaçon. Sur d'anciennes installations, dites à chambre ouverte, la bâche n'existe pas, son rôle est assuré par une chambre d'eau.

Le distributeur est formé d'une couronne comportant un ensemble d'aubes mobiles autour d'un axe parallèle à l'axe de la turbine. Les aubes sont profilées de façon à régler et à guider le débit vers l'entrée de la roue. Elles sont manœuvrées par un « cercle de vannage » relié à elles par un ensemble de biellettes et leviers. Elles doivent, dans la position fermée, assurer la fermeture du débit.

L'eau, qui sort de la roue, est conduite à l'ouvrage de fuite par un « aspirateur » ou « diffuseur » qui a pour but de récupérer le maximum d'énergie cinétique résiduelle de l'écoulement. Il a des dimensions et une forme évasée étudiées pour éviter les phénomènes de cavitation et limiter l'érosion dans les ouvrages de fuite.

5.1.3 Turbines à réaction hélicoïdales

Les turbines du type **Hélice** sont des turbines à pales hélicoïdales fixes, dont l'écoulement pénètre par des aubes directrices qui peuvent être fixes ou mobiles.

Les turbines du type **Kaplan** utilisent le même principe mais l'orientation de leurs pales est réglable. Cette possibilité de réglage en conjuguant l'orientation des pales sur celle des aubes directrices permet de larges possibilités d'adaptation aux débits et hauteurs de chute variables.

Ces turbines sont l'apanage des basses chutes. Leur axe est vertical. Leurs rendements sont bons (85 à 90 %) et se maintiennent aux charges basses. Leurs vitesses de rotation usuelles vont de 80 à 200 t/min, et l'emballement de 200 à 230 % de la vitesse nominale, si les pales sont fixes, mais atteignent 320 % si les pales sont variables. La bâche, le distributeur et le diffuseur ont des fonctions identiques à ceux des turbines Francis, mais le diffuseur est plus long.

5.1.4 Autres types de turbines à réaction

Les **groupes axiaux** sont des Hélices ou Kaplan dont l'écoulement pénètre axialement dans les aubes directrices.

Les **pompes centrifuges** peuvent fonctionner en turbine en inversant l'écoulement et, bien sur, le sens de rotation. Elles sont simples et robustes, mais correspondent à des charges faibles et peu variables. Leur courbe caractéristique vitesse/débit fait qu'elles coupent leur débit à l'emballement, ce qui entraîne un coup de bélier. Ce phénomène est à prendre en compte pour dimensionner les circuits hydrauliques.

Les turbines-pompes diagonales **Dériaz** permettent de régler les débits en pompe comme en turbine et peuvent fonctionner sur des hauteurs de chute très variables. Elles sont, par contre, d'une mécanique compliquée et fragile. Leur utilisation est réservée à des applications particulières.

5.1.5 Choix des turbines

La détermination de la turbine la plus adaptée au site se fait par comparaison à des machines identiques ; l'élément de comparaison fait appel à la notion de vitesse spécifique n_s [D 4 008].

Les abaques des constructeurs permettent un choix rapide. Elles sont établies à partir de ses réalisations passées et aussi de modèles réduits sur lesquels des essais poussés permettent de préciser les meilleurs tracés. Les conditions de turbinage (variations de débit, de chute...), la nature et le coût du générateur, l'intérêt de mettre un multiplicateur, sont autant de paramètres qui conditionnent le meilleur choix.

Si la turbine entraîne un alternateur, la vitesse sera un sous-multiple de 3 000 t/min pour les réseaux à 50 Hz (3 600 pour ceux à 60 Hz). Pour les vitesses de turbine lentes et des puissances < 2 MW, la meilleure solution consiste à mettre un multiplicateur, qui entraînera un générateur de catalogue, tournant à 750, 1 000 ou 1 500 t/min. La vitesse d'emballement entrera aussi en compte pour voir les incidences sur le dimensionnement global du groupe.

5.2 Vannes

5.2.1 Fonctions

Les vannes sont les organes permettant de mettre hors d'eau les adductions, et de fermer le débit sur les machines, ou de régler les débits à restituer, ou en crue.

Sur les ouvrages de prise, selon les types de barrages, elles peuvent assurer les fonctions de réglage de la cote, d'évacuation des crues, de dégravage, de vidange, de prise sur l'ouvrage d'amenée, de restitution...

Sur les ouvrages d'amenée, les vannes peuvent assurer les vidanges du canal ou de la galerie. En amont d'une conduite forcée, une vanne de tête est indispensable pour fermer rapidement en cas de fuite ou rupture. Dans ce cas, son action doit être automatiquement commandée par la vitesse d'eau de la conduite.

Les groupes sans distributeur réglable doivent être précédés d'une vanne. Si les groupes ne sont pas calculés pour résister à l'emballement, il est indispensable de disposer de deux organes de coupure, le premier étant assuré par le distributeur, le deuxième sera une vanne capable de couper le débit d'emballement. Cette vanne sera placée à l'amont sur les hautes chutes et à l'aval sur les Kaplan, pour éviter les vibrations importantes et les « marteaux d'eau » lors de la coupure.

Pour isoler les parties aval des installations, les dispositions pour la mise en place de batardeaux seront prévues.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

5.2.2 Vannes charpentées

Les **vannes plates** sont des organes simples pour les petites centrales. Leur partie mobile est constituée d'un bordé rectangulaire en tôle, fixé sur une charpente métallique ; l'étanchéité est assurée par des joints de caoutchouc sur le pourtour qui se plaquent sur les parties fixes latérales (glissières) et sur le seuil. Leur manœuvre se fait par traction verticale, par crémaillère, par câble de treuil ou par vérins. La manœuvre peut être manuelle ou motorisée. Elles sont suffisantes pour les petits équipements et faciles à réaliser.

Pour les dimensions plus importantes, les forces de frottement sur les glissières sont diminuées par des galets fixés sur la charpente qui roulent sur les pièces fixes.

Si elles doivent assurer des réglages de débit à l'aval d'un barrage, les vannes peuvent être en deux parties, la partie basse se levant et la partie supérieure se baissant pour laisser passer les débits de surface. Le déversement par la partie supérieure permet de régler de façon plus précise la cote du plan d'eau et les débits à déverser en cas de crues, et aussi de laisser passer les corps flottants. Le réglage par la vanne basse entraîne des usures rapides et des vibrations, mais elles peuvent être utilisées pour dégraver.

Les **vannes segments** sont constituées d'un bordé en forme de segment de cylindre à axe horizontal, fixé sur une charpente métallique qui tourne autour de l'axe du cylindre par deux axes fixés dans les piles latérales. La poussée de l'eau est reprise par les axes, ce qui minimise l'effort de manœuvre qui n'a que les seuls frottements des étanchéités à vaincre. Les manœuvres sont faites par vérins ou treuils avec câbles ou chaînes. S'il est nécessaire de régler des déversements, le segment peut être surmonté d'un clapet déversoir articulé sur le bord supérieur et commandé par des vérins embarqués sur la charpente principale. Elles permettent de boucher de grandes sections et de régler finement des débits [D 4 008].

Les **clapets** sont des vannes articulées autour d'un axe horizontal fixé au radier de la passe, ou sur l'arête supérieure d'une vanne segment. L'ouverture se fait par abaissement de la structure, et le flux d'eau déverse par-dessus la crête. Les manœuvres sont faites par vérins ou treuil avec câble ou chaîne. Dans le cas de commande par vérins, les superstructures du génie civil sont réduites. Ce type de vanne est surtout utilisé pour les grandes largeurs et des hauteurs de quelques mètres (figure **18**).

Les **vannes secteurs** ont des bordés identiques aux vannes segment mais la partie supérieure de la charpente est étanche de façon à constituer un volume fermé sous la vanne. La manœuvre se fait par remplissage ou vidange de ce volume par l'eau de la retenue.

Les **vannes toit** sont constituées de deux clapets articulés sur le radier, et pouvant rouler l'un sur l'autre ; le réglage se fait comme sur les vannes secteur (figure **19**).

Les **hausses** sont constituées par des panneaux étanches rectangulaires articulés autour d'un axe sur le radier et manœuvrables indépendamment les uns des autres. La manœuvre nécessite un chariot qui se déplace sur une passerelle. Cette technique a été utilisée pour des grandes largeurs mais nécessite des superstructures onéreuses et ont été limitées à des hauteurs faibles (2 m).

5.2.3 Autres systèmes

Les **aiguilles** sont des bouchures rudimentaires en aiguilles de bois contiguës, de section carrée, de 10 cm environ, qui s'appuient sur une poutre en radier et une en surface. Elles sont mises en place ou enlevées manuellement l'une après l'autre pour régler la cote. Cette technique était très utilisée sur les canaux de navigation, mais elle nécessite une présence humaine.

Les **boudins** de caoutchouc sont fixés sur le radier, gonflables à l'eau, ce qui permettent de régler une cote. Leur application reste limitée à des hauteurs de 2 ou 3 m (figure **4*b***).

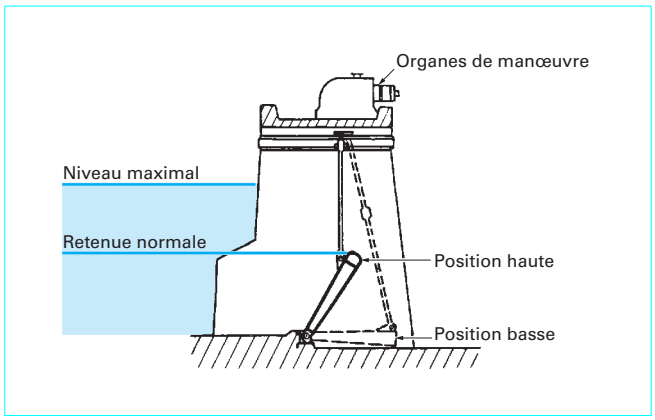

Figure 18 – Clapet

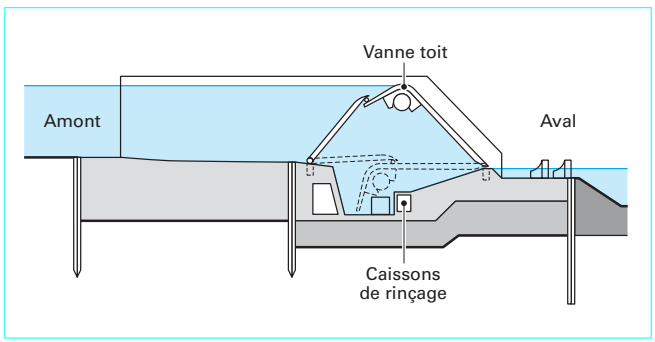

Figure 19 – Vanne toit

Les **hausses fusibles** sont des récipients parallélépipédiques qui, posés contigus sur un seuil déversoir, peuvent se remplir d'eau en cas de submersion ; une vidange calibrée assure la stabilité.

En cas de crues exceptionnelles et selon leur calibrage, ils basculent séquentiellement dans la rivière, permettant d'abaisser la cote amont. Leur usage est réservé à des applications particulières, surtout en réhabilitation.

5.2.4 Vannes en conduite

Pour les petites centrales, les vannes en conduite peuvent être du type à opercule, papillon ou sphérique. Elles se choisissent sur les catalogues des constructeurs en s'assurant des performances, en particulier de la tenue aux surpressions et aux capacités à couper les débits en charge si nécessaire (figure **20**).

Les **vannes à opercule** comprennent un opercule qui peut se déplacer dans un carter d'une position ouverte, quand il laisse libre le passage de l'écoulement, à une position fermée quand il masque complètement le passage. Ce type est principalement utilisé pour les faibles charges et petits débits.

Dans les **vannes papillon**, l'opercule circulaire tourne autour d'un axe horizontal ou vertical. En position fermée, l'opercule ferme totalement le circuit, en position ouverte il est dans le sens des écoulements. La commande se fait par rotation de l'arbre, soit par un système de volant et vis sans fin, soit par un vérin capable de résister au couple de réaction de l'écoulement sur l'opercule. Son utilisation en organe de sécurité en amont de la turbine est usuelle jusqu'à des débits de 3 à 4 m^3/s.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

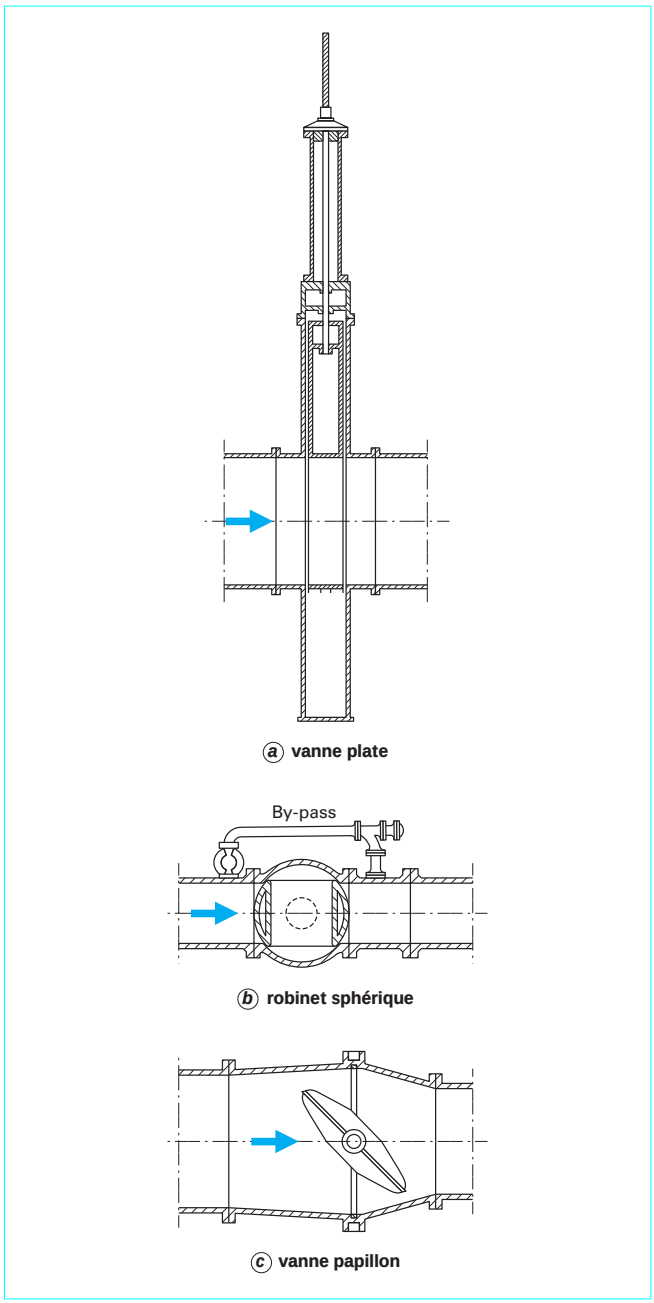

Figure 20 – Vannes en conduite

Dans les **robinets sphériques**, le papillon est remplacé par un opercule sphérique percé d'un alésage de diamètre égal à celui des pièces fixes.

Sur les chutes importantes, l'étanchéité est assurée par un anneau mobile, axialement dans l'entrée de la vanne, qui vient se plaquer sur un anneau fixé sur l'opercule. L'utilisation en organe de sécurité en amont de la turbine est usuelle pour les chutes élevées.

Les **vannes à jets creux** ou les **vannes à pointeaux** sont des vannes qui permettent des réglages précis des débits sous des charges importantes.

5.2.5 Batardeaux

Ce sont des bouchures qui permettent d'assurer les mises hors d'eau des circuits hydrauliques pour assurer les entretiens. Ils sont constitués d'éléments manœuvrables manuellement, pour les petites sections, ou mécaniquement par des engins fixes ou mobiles. Ils s'installent dans des rainures latérales prévues dans le génie civil s'ils sont constitués de panneaux de la largeur du bief. Ils peuvent aussi être constitués d'aiguilles en aluminium qui s'appuient sur une rainure de fond et sur une poutre passerelle de surface. L'étanchéité toute relative peut être améliorée par des apports en amont de matériaux tel que le mâchefer.

5.2.6 Siphons

Le principe du siphon est utilisé pour constituer un évacuateur de crues sans vannes, et aussi pour réaliser des groupes axiaux. Les conduites sont en forme de siphon avec la partie amont plongeant dans la retenue et la partie aval déversant dans la rivière (figure **6**).

5.2.7 Déchargeurs

Ce sont des vannes qui permettent de détourner le débit à couper sur un ouvrage, ou une machine pour éviter la surpression, ou l'intumescence due à la rapidité de coupure. Sur une adduction, le déchargeur est une vanne charpentée décrite en § 5.2.2 qui débite dans l'ouvrage de décharge.

En conduite, pour protéger une turbine Francis, le déchargeur est une vanne qui s'ouvre automatiquement avec la surpression et qui dissipe l'énergie de l'eau dans le canal de fuite. C'est en général une vanne à pointeau actionné par la pression de la conduite.

5.3 Grilles et évacuation des corps flottants

5.3.1 Grilles

Elles sont obligatoires pour éviter l'entrée de corps étrangers dans les conduites et surtout les turbines. Elles sont, en général, constituées de barreaux plats en acier, assemblés avec des espaces réguliers qui doivent être inférieurs aux sections de passage des écoulements le long des circuits (espace entre les aubes de la turbine). L'espacement entre barreaux est souvent imposé par le cahier des charges du titre administratif en relation avec la protection des poissons. La surface de passage doit être dimensionnée pour que les vitesses d'eau soient inférieures à 1 m/s.

Leur propreté joue un rôle primordial dans les pertes de charge, et donc le rendement de l'équipement.

5.3.2 Dégrilleurs

Les grilles doivent pouvoir être nettoyées facilement, soit à la main si les apports flottants sont rares (ce qui est exceptionnel), soit par un dégrilleur.

Le dégrilleur est constitué d'un râteau de la largeur de la passe si elle est inférieure à 5 ou 6 m.

Sur les passes plus larges, l'appareil devra être mobile sur des rails. Le râteau est mû par des bras ou des chaînes qui le font descendre, éloigné des grilles, et remonter en raclant celles-ci. Les dégrillats remontés sont évacués par une goulotte dans un bac ou bassin à déchets d'où ils seront évacués par des moyens terrestres. L'évacuation de la goulotte se fait par une chasse d'eau simultanée à la marche du dégrilleur. La motorisation des mouvements peut être à vérins ou à câbles.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

Les constructeurs proposent des modèles éprouvés, mais le choix doit se faire en fonction des corps transportés par la rivière. S'il n'y a que des feuilles ou des herbages, un râteau léger est suffisant mais doit pouvoir fonctionner souvent et rapidement. Si, de plus, des arbres ou autres corps volumineux sont possibles, il est nécessaire de prévoir des appareils adaptés avec des râteaux puissants et la possibilité d'utiliser un grappin. L'évacuation des déchets doit être réalisée en accord avec les règles locales d'urbanisme.

5.3.3 Dromes

Elles sont efficaces pour éviter les gros apports de surface. Elles sont constituées de flotteurs en tubes d'acier, de diamètre de 500 ou de 600 mm, une jupe en tôle, soudée sous sa partie inférieure, la relie à une quille qui sert de lest. L'ensemble flottant est fixé en amont de la prise, de façon à faire un angle avec le courant, pour envoyer les corps flottants vers un clapet du barrage. Elles permettent aussi de protéger les éventuelles embarcations du courant d'appel de la prise.

6. Matériels et services auxiliaires

6.1 Multiplicateurs

Sur les basses chutes, le choix de la turbine la plus adaptée conduit à avoir une vitesse de rotation basse et donc un générateur très cher. Il est donc préférable d'optimiser la turbine pour avoir la meilleure utilisation de la chute et d'entraîner le générateur par un multiplicateur pour avoir des coûts de générateur plus bas, c'est-à-dire des générateurs qui tournent à 750, 1 000 ou 1 500 t/min.

Sur les anciennes installations, on trouve des multiplicateurs à courroie, la turbine entraînant une poulie de grand diamètre qui, par la courroie, entraîne une poulie de petit diamètre sur l'arbre du générateur. Ces solutions ne permettent que des puissances de quelques centaines de kW.

On trouvait aussi des multiplicateurs à engrenage en bois, les alluchons, qui s'utilisaient dans des domaines de puissance très faibles.

À l'heure actuelle, les multiplicateurs sont à engrenages en acier dans l'huile, en général à deux trains et capables de transmettre des puissances plus importantes (jusqu'à 2 MW). L'huile permet d'évacuer les pertes par frottement des engrenages, des paliers et des butées ou pivots.

On trouve aussi des multiplicateurs à engrenages coaxiaux à trains épicycloïdaux. Cette solution permet de diminuer le diamètre des groupes bulbes.

Pour tenir compte des conditions transitoires de la turbine, le multiplicateur doit être bien dimensionné en régime normal, et admettre des couples de surcharge de facteur trois. Les normes de la profession précisent ces conditions d'utilisation.

6.2 Paliers, butées et pivots

L'arbre des groupes à axe horizontal est porté et tourne autour de paliers, et les mouvements de translation sont contenus par une butée qui doit reprendre la poussée hydraulique des turbines à réaction ou type Turgo. Les groupes verticaux sont portés par leur pivot et l'arbre est guidé par des paliers.

Les **paliers** peuvent être du type :

— à coussinets ;
— à billes ;
— ou à rouleaux.

Les roulements et les rouleaux sont des organes du commerce. Les coussinets sont en « régule » (alliage antifriction de plomb et d'étain), graissés par de l'huile entraînée par une ou deux bagues. L'huile doit être refroidie dans des réfrigérants à air, à eau pour les grosses machines. Sur certaines machines anciennes, les coussinets étaient en bois de gaïac lubrifié et refroidi à l'eau.

Les **butées** sont normalement incluses dans un des paliers. Elles peuvent être à billes ou à coussinets.

Les **pivots** supportent le poids de la partie tournante et la poussée hydraulique ; ils doivent être dimensionnés en conséquence.

Ces organes sont normalement fournis avec la machine principale, turbine, multiplicateur ou générateur. Les fournitures font actuellement appel à des fabrications sur catalogue. Il est nécessaire que ces organes soient dimensionnés correctement, prenant en compte les phénomènes transitoires. Les systèmes de refroidissement doivent être simples et efficaces, sans contrainte pour l'exploitant.

7. Matériels électriques

7.1 Générateurs

L'énergie mécanique de la turbine, transmise par l'arbre, est transformée en énergie électrique par un générateur qui peut être un alternateur synchrone ou une génératrice asynchrone. Le courant électrique des réseaux est en principe le courant alternatif de 50 Hz (ou 60 Hz) triphasé.

Un générateur comprend un rotor et un stator réalisés en tôles magnétiques. Le rotor est fixé sur l'arbre et le stator sur une carcasse fixée sur un châssis solidaire du génie civil de l'usine, l'espace entre rotor et stator s'appelant l'entrefer. Le rotor doit aussi entraîner les ailettes de ventilation qui impulsent l'air frais entre les enroulements et le circuit magnétique pour évacuer les pertes magnétiques et celles par effet Joule des enroulements.

Une **génératrice asynchrone** est un moteur asynchrone qui, entraîné par la turbine, fonctionne avec un glissement négatif (vitesse supérieure au synchronisme) et est maintenue à cette vitesse par l'énergie réactive fournie par le réseau. Ces machines sont donc des consommatrices d'énergie réactive qu'il faut fournir avec des batteries de condensateurs.

Un **alternateur** fonctionne au synchronisme grâce à son rotor qui fournit l'énergie réactive nécessaire. Celle-ci est fournie par un courant d'excitation continu, injecté dans l'enroulement rotor. Ce courant est produit, soit par un alternateur d'excitation inversé à redresseur tournant sur le même arbre, soit par un générateur à courant continu injecté sur le rotor par deux bagues. Ces générateurs sont actuellement des redresseurs de courant soutiré sur la production et très faciles à régler ; anciennement c'était des génératrices à courant continu, qui était en bout d'arbre, qui fournissaient ce courant. Sur les très petites machines anciennes, le rotor pouvait être à aimant permanent. Les vitesses de rotation sont des diviseurs de 3 000 t/min sur les réseaux à 50 Hz, de 3 600 t/min sur les réseaux à 60 Hz. Les groupes actuels les plus économiques proposés par les constructeurs tournent à 750, 1 000 ou 1 500 t/min.

Le choix entre les deux types de générateurs est technique et économique. La génératrice asynchrone est moins chère, d'encombrement plus réduit et plus résistante à l'emballement (son rotor est plus simple et robuste), et de couplage plus simple. Par contre, elle nécessite une batterie de condensateurs importante dont les coûts d'entretien et de renouvellement sont élevés. Elles sont donc utilisées pour les faibles puissances sur les réseaux importants. L'alternateur est adapté aux réseaux isolés et aux puissances plus élevées, la qualité du courant est plus stable. Les technologies modernes ont permis de baisser ses coûts. Les isolants, en particulier, sont beaucoup plus performants et de classe de température plus élevée. Une attention particulière sera apportée au refroidissement.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

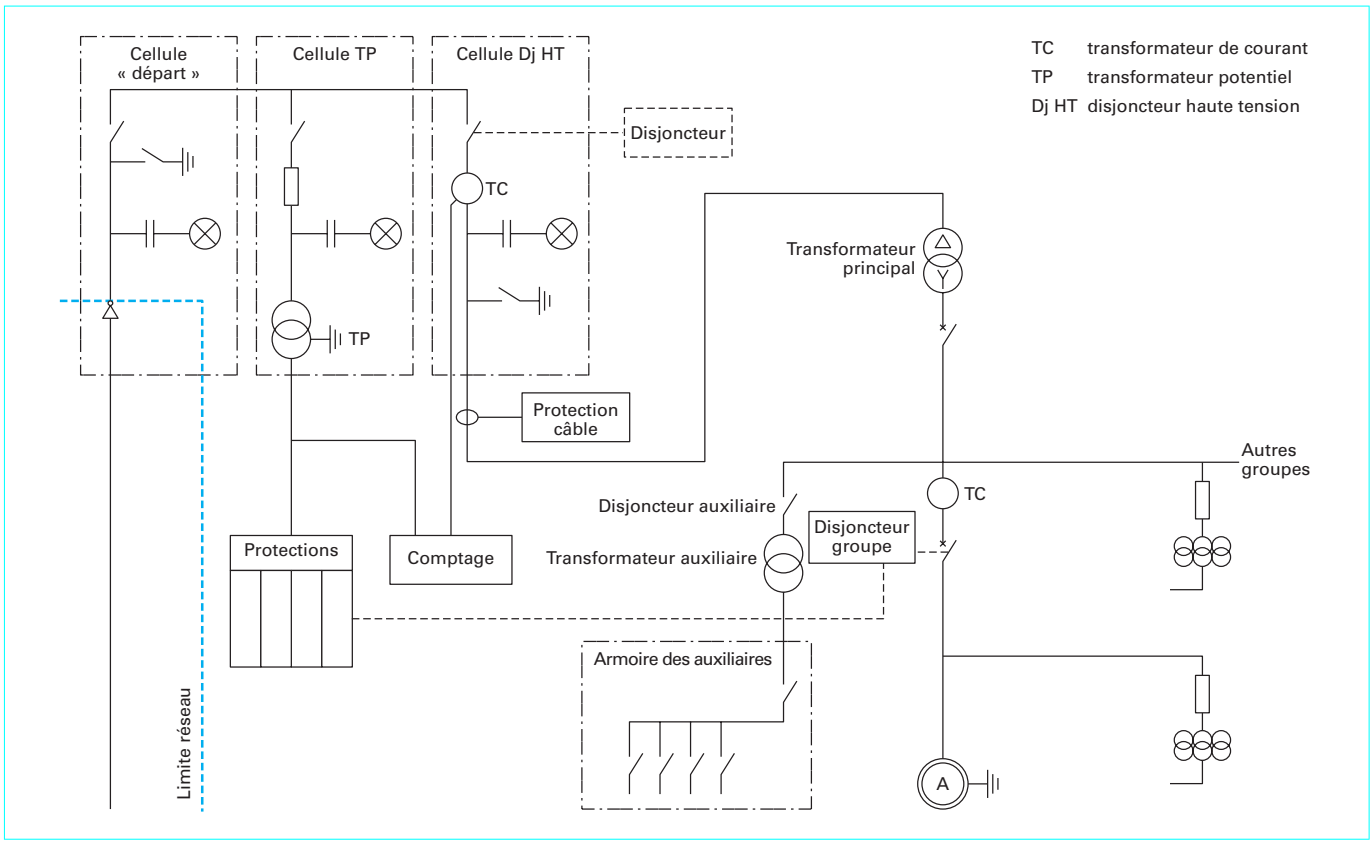

Figure 21 – Schéma unifilaire (exemple)

En pratique, les génératrices asynchrones sont réservées aux faibles puissances (< 200 kW).

7.2 Transformateurs

Les générateurs produisent un courant sous des tensions qui ne sont pas celles du réseau de livraison et il est indispensable de séparer galvaniquement les tensions de l'usine d'avec celles du réseau. Un transformateur est donc indispensable, son rapport de transformation sera tel que la haute tension sera celle du réseau (en général 20 kV).

Les transformateurs sont constitués d'un circuit magnétique fermé entouré de deux enroulements, l'un basse tension, l'autre haute tension, tous les deux isolés par du palier enrubanné autour des conducteurs et le tout contenu dans une cuve pleine d'huile isolante. Les conducteurs sont solidement calés dans la cuve avec des cartons contraints pour résister aux efforts électrodynamiques sur cour-circuit ou coup de foudre. L'huile doit être traitée pour être sèche et sans gaz. L'huile sert d'isolant et de caloporteur pour assurer l'évacuation des pertes du circuit magnétique et des enroulements. L'huile doit donc être refroidie dans des réfrigérants à air, en général avec des ailettes sur les parois de la cuve. Un dispositif de rétention d'huile doit éviter son écoulement accidentel dans la rivière.

Des technologies modernes ont permis de développer des transformateurs secs, dont les enroulements sont imprégnés de résine polymérisée. Cette technique séduisante est limitée aux faibles puissances, le refroidissement des parties actives étant difficile. Elles est, par contre, devenue la norme pour les transformateurs de mesure ou de soutirage.

Les transformateurs de mesure sont des transformateurs de précision pour ramener les tensions à 100 V et les courants à 5 A, valeurs qui sont les calibres normalisés des appareils de mesure, comptage et protection.

7.3 Circuits électriques de puissance

7.3.1 Organes de coupure

Le schéma électrique de puissance est simple. Entre les générateurs, les transformateurs de puissance et d'alimentation des auxiliaires et le point de livraison, les organes de coupure, d'isolement, de mesure sont reliés par des câbles de puissance (figure **21**).

Les organes de coupure ont les fonctions suivantes :

— un **disjoncteur** est un organe de protection et de coupure. Il se ferme et s'ouvre par commande électrique sur ordre manuel ou automatique. Il est capable de couper des courants de court-circuit importants de plusieurs dizaines de kA sous sa tension nominale. Cette capacité est nécessaire en fonction de la puissance de court-circuit qui existe sur l'appareil qu'il protège ;

— un **contacteur** est un organe de coupure comme le disjoncteur, mais son pouvoir de coupure est plus faible, par contre sa résistance mécanique est plus grande et il est garanti pour un grand nombre de manœuvres (100 000) ;

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
© Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

— un **interrupteur** est un organe de coupure limité à ses capacités normales et pour protéger un circuit. Il doit être associé à des fusibles à haut pouvoir de coupure ;

— un **sectionneur** est un appareil à coupure visible pour s'assurer qu'un circuit est hors tension. Il n'a pas de pouvoir de coupure, mais une capacité d'isolement. Associé à un sectionneur de mise à la terre, il est l'instrument d'isolement et de mise en sécurité d'un circuit pour y travailler dessus ;

— les **fusibles HT** sont des organes de protection qui coupent un circuit pour une intensité déterminée sous la tension spécifiée mais qui est détruit par cette coupure.

7.3.2 Câbles

Les câbles de puissance relient les bornes du générateur aux différents organes électriques : de coupure, mesure, d'alimentation des services auxiliaires et de départ au réseau. Ces organes sont actuellement montés dans des cellules fermées. Anciennement, ils étaient dans des postes aériens, les conducteurs étant nus ; l'isolement était assuré par l'air.

Les câbles moyenne tension actuels sont constitués d'une âme en cuivre ou aluminium, isolée par des isolants synthétiques, comme le polyéthylène réticulé (PR), le polychlorure de vinyle (PVC) et l'éthylène-propylène (EPR). Un écran en ruban de cuivre ou une gaine de plomb entoure l'isolant et une protection extérieure adaptée à l'environnement entoure le tout.

Anciennement, l'isolant était du papier imprégné. Les tensions de service sont normalisées, ainsi que les sections.

7.4 Cellules de haute tension

Les appareils électriques sont installés dans des cellules fermées en exploitation, ce qui permet de les installer dans la salle des machines avec un gain de place important. Ces armoires préfabriquées contiennent :

— les organes de coupure des circuits principaux et auxiliaires ;
— les dispositifs de mise à la terre ;
— les transformateurs de mesure et comptage.

7.5 Ligne de transport

Elle relie la centrale au point de livraison du réseau général de distribution ou de transport d'électricité. Ce point est fixé par le contrat de raccordement ou de vente. Elle peut être en câbles isolés enterrés, ou aériens, ou en conducteurs nus sur poteaux.

Les centrales sont parfois éloignées des points de livraison et le coût de cet ouvrage n'est pas négligeable.

8. Automatismes et conduite

Sur les petites centrales, les régulations de tension et vitesse se font avec des régulateurs dont les prix sont devenus beaucoup plus compétitifs avec le développement de l'électronique et de l'informatique. Leur mise en place peut se faire selon leur importance dans des modules communs ou des modules séparés.

Sur les très petites puissances, débitant sur un petit réseau isolé de puissance inférieure aux capacités de la centrale, les réglages peuvent se faire par absorption d'énergie, les charges locales étant éliminées quand la consommation augmente et ajoutées quand elle baisse.

8.1 Régulation de vitesse (RV)

Elle est en principe fournie par le turbinier, mais peut être intégrée à l'automate de conduite. Les petites centrales, raccordées à un réseau important, n'ont besoin que d'un régulateur qui pilote la vitesse avant couplage et l'ouverture du distributeur. Celles qui ont une importance sur le pilotage de la fréquence d'un petit réseau isolé ont besoin d'une régulation en fonction de la fréquence.

Le réglage de l'ouverture des écoulements doit se faire en prenant en compte l'interaction entre les phénomènes mécaniques sur la machine et hydrauliques sur les adductions. En particulier, sur un arrêt rapide sur défaut, un compromis doit être trouvé entre la surpression dans la conduite ou l'intumescence sur le canal d'amenée et la survitesse admise sur les parties tournantes. La prise de charge doit aussi prendre en compte la dépression sur les organes d'amenée.

La survitesse maximale lors d'un déclenchement à pleine charge dépend de l'inertie de la partie tournante et de la vitesse de fermeture de l'écoulement. En pratique, on admet 30 à 50 %.

8.2 Régulation de tension (RU)

Sur une génératrice asynchrone, la régulation de tension n'existe pas. Un système pilotant la connexion de condensateur en plus ou en moins est possible si nécessaire.

Sur les alternateurs synchrones, le système de régulation a pour but de régler la tension avant couplage et la fourniture de réactif après couplage. Sur un petit réseau isolé, il participe au réglage de la tension.

8.3 Automatismes de conduite et protection

La conduite des centrales peut être totalement automatique. Outre les régulations de vitesse et tension, les automates de groupe doivent assurer le démarrage et l'arrêt et la protection des machines, son couplage au réseau. Les automates de la centrale doivent assurer la répartition des charges des groupes en fonction du débit entrant ou des consignes de production, la protection des services généraux de la centrale et la supervision du fonctionnement.

8.3.1 Automate de démarrage et arrêt

Si le groupe est à l'arrêt et qu'il reçoit l'ordre de démarrage, l'automate vérifie si les conditions le permettent, en particulier l'absence de défaut, les conditions de débit, la présence de tension sur le réseau. Il donne les ordres nécessaires à chaque phase de démarrage, phases qui sont déterminées par la position des organes manœuvrés.

Si un ordre d'arrêt normal est donné par un automate ou manuellement, il ramène le groupe à l'arrêt en diminuant progressivement la puissance de façon à ne pas créer de survitesse ou surpression.

Si un ordre d'arrêt d'urgence est donné par l'automate de protection ou manuellement, il procède à l'ouverture du disjoncteur et simultanément à la fermeture de l'admission et à la désexcitation rapide de l'alternateur. La machine ne pourra alors redémarrer que lorsque la situation bloquante aura disparu ou lorsque le défaut sera éliminé.

8.3.2 Asservissement au débit et télécommande

Sur les centrales au fil de l'eau, l'automate envoie les ordres d'ouverture ou de fermeture du vannage en fonction des débits. En fait, il ne mesure pas le débit mais règle le plan d'eau à la cote

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008

d'exploitation par l'ouverture, ou la fermeture du vannage du groupe. Quand la centrale comprend plusieurs groupes, la mise en service des groupes est optimisée pour faire travailler les turbines dans les meilleures conditions de rendement.

Quand plusieurs centrales sont en chaîne sur une rivière comme, par exemple, les centrales utilisant la chute des barrages de navigation, il s'avère indispensable d'avoir une gestion coordonnée des biefs pour éviter l'amplification des perturbations le long de la chaîne.

Sur les centrales avec une retenue, qui travaillent par éclusées, et si le tarif de vente est favorable, l'ordre de démarrage est donné par un programmateur, pour placer l'énergie sur des postes horaires plus rémunérateurs. L'ordre d'arrêt peut être donné par la détection de niveau bas, ou par le programmateur.

8.3.3 Automate de protection

Il reçoit les valeurs des mesures des capteurs nécessaires à la protection des machines, de la centrale et du réseau. Ces valeurs sont, soit des valeurs extrêmes dont la détection a pour conséquence de donner un ordre à l'automate de démarrage et arrêt, soit des informations nécessaires à l'exploitant. Les valeurs nécessaires pour la protection des machines sont prévues par les constructeurs ou déduites des contraintes d'exploitation des plans d'eau.

8.3.4 Comptages

Ils sont nécessaires à l'établissement des factures dans le cadre du contrat de vente, les valeurs élaborées à partir des transformateurs de mesure de tension et d'intensité. Les comptages d'énergies active et réactive sont enregistrés et classés selon les postes horaires définis par les contrats de vente. Ils peuvent être télétransmis à l'acheteur et permettent de suivre la production et sa valeur.

8.3.5 Télésurveillances

L'informatique, avec ses capacités de traitement des informations et des images, permet à l'exploitant de superviser à distance les événements nécessaires à la bonne gestion des installations. Les industriels, proposant ces équipements, sont souvent spécialisés dans la mise en place des matériels et logiciels, et de leurs paramétrages. Ils assurent la maintenance à distance, ou sur place si nécessaire.

9. Exploitation

La maintenance vise à maintenir l'outil en état de fonctionner le plus économiquement possible, en assurant la sûreté des personnes et des installations et la productivité des matériels.

La sûreté hydraulique doit être maximale. Les énergies de l'eau sont importantes même pour les petites centrales et les rivières sont de plus en plus fréquentées pour des activités diverses (pêche, loisirs, sports nautiques...). Un dysfonctionnement peut avoir des conséquences graves pour la continuité de l'exploitation et l'image de l'hydroélectricité.

L'exploitant doit avoir une bonne connaissance des installations, de leur conception et des entretiens obligatoires. Lors de la construction et des réceptions, l'exploitant doit y assister et doit disposer ou établir toutes les fiches de contrôles et mesures, il doit faire et établir les fiches de maintenance. En exploitation, l'historique des mesures, des contrôles, des dépannages et des entretiens est un outil de rentabilité de l'exploitation. Il est aussi une preuve de la bonne exploitation pour le cas où les responsabilités de l'exploitant seraient utiles à prouver, en particulier sur les ouvrages de retenue et matériels de manœuvre.

La bonne maintenance permet de négocier avec avantage les primes d'assurance et de prévoir les charges d'exploitation de façon plus précise.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur

Dossier délivré pour
Madame, Monsieur
17/09/2008